

УДК 666.76.041:519.28

ІВАНОВ Віктор Ілліч, старший науковий співробітник
НЕСТЕРЕНКО Тетяна Миколаївна, доцент, кандидат технічних наук
ЗІНЧЕНКО Володимир Юрійович, доцент, кандидат технічних наук
ЧЕПРАСОВ Олександр Іванович, професор, кандидат технічних наук

МЕТОД ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ВИПАЛЕННЯ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ ВОГНЕТРИВІВ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТУНЕЛЬНИХ ПЕЧАХ

(Повідомлення 2)

Запорізька державна інженерна академія

На основі вирішення диференціального балансового рівняння теплообміну пластини у протитечії розроблено методи інженерного розрахунку коригування інтервалу часу між проштовхуванням пічних вагонеток із садками напівфабрикату вогнетривів каналом тунельної печі та коригування витрати повітря на охолодження випалених вогнетривів. Детально викладено методику обчислення коефіцієнтів тепловіддачі у зоні охолодження печі. Використання зазначених методик дозволить підвищити якісні показники готової продукції.

Ключові слова: високотемпературна тунельна піч, вогнетриви, рівняння теплообміну пластини у протитечії, інтервал часу між проштовхуванням пічних вагонеток, витрата повітря на охолодження, коригування

Вступ. Змінювання теплового режиму роботи тунельних печей вогнетривких цехів для виготовлення нового виду продукції, а, отже, застосування раціональніших схем садки напівфабрикату на пічні вагонетки, спричинюють коригування теплофізичних параметрів, які характеризують зовнішній і внутрішній теплообмін у зоні випалення печі.

Постановка завдання. Переведення роботи тунельної печі на нову схему садки напівфабрикату потребує коригування інтервалу часу між проштовхуванням вагонеток пічним каналом, а також витрати повітря на охолодження випалених вогнетривів.

Головна частина досліджень. Для визначення характеру такого коригування використовують вирішення диференціального балансового рівняння теплообміну пластини у протитечії з введенням поправки на її масивність [1] у вигляді

$$\frac{\bar{T}_m}{T_\tau} = 1 - \exp \left[\left(-\frac{\alpha_\Sigma \cdot F_\Sigma \cdot n}{G_m \cdot \bar{c}_m \cdot m} \right) \cdot \left(\tau - \frac{G_m \cdot \bar{c}_m}{V_\tau \cdot \bar{c}_\tau} \right) \right], \quad (1)$$

де \bar{T}_m – середня за перерізом садки температура напівфабрикату за будь-який час його нагрівання, К; T_τ – температура теплоносія (повітря) на вході до протитечії, К; α_Σ – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); F_Σ – питома поверхня напівфабрикату в протитечії, що сприймає теплоту та є віднесеною до одиниці його об'єму,

м²/м³; n – кількість пічних вагонеток у зонах підігрівання та випалення печі; G_m – масова витрата напівфабрикату кг/с; \bar{c}_m – теплоємність напівфабрикату, що є середньою у інтервалі температури $0 - \bar{T}_m$, кДж/(кг·К); m – поправковий коефіцієнт, що враховує масивність стовпчика садки напівфабрикату; τ – тривалість інтервалу часу між проштовхуванням вагонеток у печі, с; V_τ – об'ємна витрата теплоносія у зоні випалення печі, м³/с; \bar{c}_τ – теплоємність теплоносія, що є середньою у інтервалі температур $0 - T_\tau$, кДж/(м³·К).

Стабільність безрозмірної середньої температури напівфабрикату, що завантажено до садки нової конструкції, на виході із зони випалення тунельної печі може бути одержаною лише у разі, коли забезпечується інваріантність показника ступеня експоненти у рівнянні (1), тобто

$$\frac{\alpha_\Sigma \cdot F_\Sigma \cdot n}{G_m \cdot \bar{c}_m \cdot m} \left(\tau - \frac{G_m \cdot \bar{c}_m}{V_\tau \cdot \bar{c}_\tau} \right) = \text{idem} . \quad (2)$$

Тоді тривалість часу між проштовхуванням пічних вагонеток для садки напівфабрикату нової (j -ої) конструкції каналом печі можна визначити як

$$\tau_j = \frac{\vartheta \cdot (1 + m_j)}{\alpha_{\Sigma,j} \cdot F_{\Sigma,j}} \cdot \Omega_1 + \Omega_2, \quad (3)$$

де

$$\vartheta = \frac{\alpha_{\Sigma,j} \cdot F_{\Sigma,j} \cdot n}{V_T \cdot \bar{c}_T \cdot (1+m_j)} \cdot \left(\frac{V_T \cdot \bar{c}_T}{G_M \cdot \bar{c}_M} - 1 \right); \quad \Omega_1 = \frac{G_M \cdot \bar{c}_M}{n};$$

$$\Omega_2 = \frac{G_M \cdot \bar{c}_M}{V_T \cdot \bar{c}_T}.$$

Методику розрахунків параметрів, що входять до рівняння (3), детально викладено у роботі [2].

Відомо, що під час випалення напівфабрикату вогнетривів визначальну роль має зона охолодження тунельної печі, яка забезпечує не лише заданий режим охолодження випалених вогнетривів, але й надходження до зони випалення повітря для горіння палива.

Охолодження вогнетривів за температури нижче ніж 1000 °С супроводжується виникненням термічних напружень, які під час змінювання інтервалу часу між проштовхуванням пічних вагонеток каналом печі, за інших рівних умов, призводять до порушення суцільності готової продукції.

У зв'язку з цим виникає необхідність стабілізації її якості на стадії охолодження в тунельних печах за різного інтервалу часу між проштовхуванням пічних вагонеток.

До основи управління роботою зони охолодження печей даного типу може бути покладено вирішення трансцендентного рівняння, одержаного з диференціального балансового рівняння теплообміну в протитечії [1]. Його використання дозволить здійснювати коригування витрати повітря V_n , що надходить до каналу печі для забезпечення заданого режиму охолодження випалених вогнетривів під час змінювання інтервалу часу між проштовхуванням вагонеток на зміну:

$$V_n = \frac{\theta \cdot \left\langle V_n \cdot \bar{c}_n - \frac{M_g}{\tau} \cdot \exp \left[\Phi \cdot \left(\frac{M_g \cdot \bar{c}_g}{V_n \cdot \bar{c}_n} - \tau \right) \right] \right\rangle}{\bar{c}_n \cdot \left\langle 1 - \exp \left[\Phi \cdot \left(\frac{M_g \cdot \bar{c}_g}{V_n \cdot \bar{c}_n} - \tau \right) \right] \right\rangle}, \quad (4)$$

де θ – безрозмірна температура випалених вогнетривів на виході із зони охолодження печі;

$\theta = \frac{\bar{T}_{g,0} - \bar{T}_g}{\bar{T}_{g,0} - T_n}$; $\bar{T}_{g,0}$, \bar{T}_g – середня масова температура випалених вогнетривів на вході та виході зони охолодження печі, К, відповідно; T_n – температура повітря на виході із зони охолодження, К;

\bar{c}_n – середня теплоємність повітря у зоні охолодження, кДж/(м³·К); M_g – маса садки випалених вогнетривів на пічних вагонетках у зоні охолодження, кг; \bar{c}_g – середня теплоємність випалених вогнетривів у інтервалі температур $\bar{T}_{g,0}$ –

\bar{T}_g , кДж/(кг·К); $\bar{\alpha}$ – середній за довжиною зони охолодження печі коефіцієнт тепловіддачі від поверхні садки напівфабрикату до потоків повітря, що надходить до печі, Вт/(м²·К); $\Phi = \bar{\alpha} \cdot F_M \cdot V_g \cdot n / M_g \cdot \bar{c}_g \cdot (1+Bi)$; F_c , V_g – сумарна поверхня садки випалених вогнетривів, що сприймає теплоту в зоні охолодження, м², та об'єм садки, м³, відповідно; Bi – критерій масивності садки випалених вогнетривів; $Bi = \bar{\alpha} \cdot S_p / \lambda_g$; S_p – розрахункова товщина стовпчика садки вогнетривів, м, форму якого подають як необмежену пластину; λ_g – коефіцієнт теплопровідності випалених вогнетривів, що відповідає його середній температурі у зоні випалення, кВт/(м·К); його значення визначають за експериментальними даними [3,4], а також шляхом обчислень [5,6].

Значення параметра $\bar{\alpha}$ можна визначити за формулою [7]:

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{\text{конв}} + \bar{\alpha}_{\text{випр}}, \quad (5)$$

де $\bar{\alpha}_{\text{конв}}$ – середній коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від поверхні садки вогнетривів до потоків повітря, що надходить до зони охолодження, Вт/(м²·К) [8]:

$$\bar{\alpha}_{\text{конв}} = \bar{\alpha}_{\text{бок}} + \frac{1,46 S_p}{X_c} \cdot \bar{\alpha}_{\text{торц}}, \quad (6)$$

де $\bar{\alpha}_{\text{бок}}$ – середній коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від бічних подовжніх поверхонь садки випалених вогнетривів до потоків повітря, Вт/(м²·К); X_c – довжина садки вогнетривів, м; $\bar{\alpha}_{\text{торц}}$ – середній коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від торцевих поверхонь стовпчиків садки вогнетривів до потоків повітря, Вт/(м²·К),

$\bar{\alpha}_{\text{торц}} = \frac{0,043 \text{Re}^{0,7} \cdot \lambda_n}{d_{e,k}} \left(0,50 + \frac{0,10 \delta}{r} \right)^{0,5}$, r – відстань між вогнетривами за поперечним напрямом садки, м; $\bar{\alpha}_{\text{випр}}$ – середній коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від поверхні садки вогнетривів до потоків повітря, Вт/(м²·К); згідно з роботою [9], його значення складає 0,33 % величини коефіцієнта тепловіддачі конвекцією.

Для подовжніх поверхонь садок вогнетривів із гратчастими стовпчиками

$$\bar{\alpha}_{\text{бок}} = 0,068 \text{Re}^{0,7} \frac{T_{\phi}^{0,5}}{\text{Pr}^{0,4}} \cdot \frac{\bar{\lambda}_n}{d_{e,k}}, \quad (7)$$

де Re – критерій Рейнольдса; $\text{Re} = \bar{W}_n \cdot d_{k.e.} / \bar{\nu}_n$; \bar{W}_n – середня за довжиною зони охолодження швидкість руху потоків повітря щодо перерізу печі, м/с; методику її обчислення подано у роботі [8]; $d_{k.e.}$ – еквівалентний діаметр каналу, м,

через який відбувається теплообмін; \bar{v}_n – середній коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, $\text{м}^2/\text{с}$; T_ϕ – коефіцієнт, що враховує вплив перепаду температури між поверхнею вогнетривів і потоками повітря, на інтенсивність теплообміну в зоні охолодження; $T_\phi = T_{кл} / T_n$; $T_{кл}$, T_n – температура кладки у пічному каналі зони охолодження та повітря, К, відповідно; Pr – критерій Прандтля, \bar{v}_n / \bar{a}_n ; \bar{a}_n , $\bar{\lambda}_n$ – середній коефіцієнт теплопровідності, $\text{м}^2/\text{с}$, та теплопровідності повітря у зоні охолодження $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, відповідно.

Для подовжніх поверхонь садок вогнетривів із суцільними стовпчиками [10]:

$$\bar{\alpha}_{\text{бок}} = 0,068 \Pi \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \frac{\bar{\lambda}_n}{d_{e,к}}, \quad (8)$$

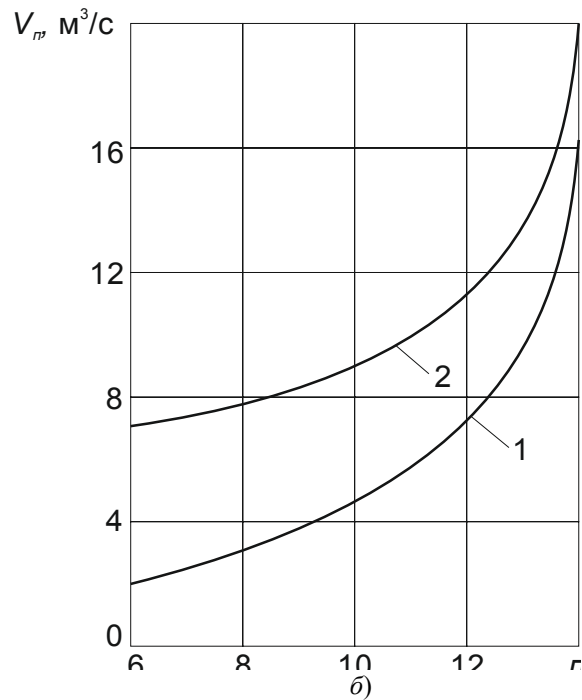
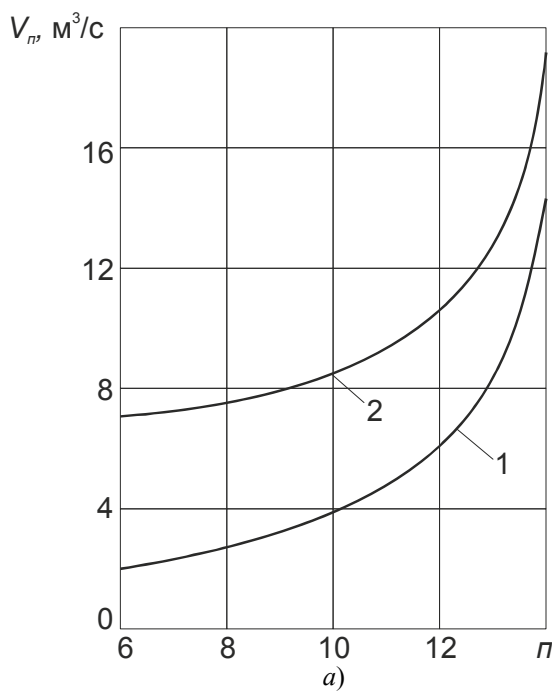
де Π – коефіцієнт, що враховує змінювання інтенсивності теплообміну за нестабілізованої течії повітря у каналах садки вогнетривів;

$$\Phi = 1 + \frac{45,5(d_{e,к}/X_k)(\ell/\delta)}{(1+0,6\ell/a)} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{0,55X_k}{d_{e,к}}\right) \right]; \text{ де } \frac{\ell}{\delta}, \frac{\ell}{a}$$

– критерій входу повітря до каналу садки та критерій режиму руху повітря вздовж каналу садки відповідно; ℓ – подовжній розрив між стовпчиками садки, м; X_k – довжина каналу садки, м.

Відповідно до запропонованої методики виконано обчислення витрати повітря, що надходить до зони охолодження тунельної печі шамотного цеху ПАТ «Запоріжжвогнетрив» під час випалення напівфабрикату марки КШУ-16 у п'яти та шестистовпчикових схемах садки. Початкові дані для розрахунків було одержано під час досліджень теплообміну в зоні охолодження зазначеної печі за дев'яти проштовхувань вагонеток каналом печі на зміну, які дозволяють, за даними практики, одержувати продукцію стабільної якості, що задовольняє вимогам стандарту.

Результати розрахунків витрати повітря, що надходить до зони охолодження печі за змінюванням кількості проштовхувань пічних вагонеток на зміну та схеми розташування напівфабрикату вогнетривів, подано на рис. 1.



1 - загальна витрата повітря на піч для забезпечення режиму охолодження випалених вогнетривів; 2 - загальна витрата повітря на піч, що враховує його використання під час спалювання палива у зоні випалення

Рисунок 1 – Залежність витрати повітря, що надходить до зони охолодження тунельної печі, від інтервалу часу між проштовхуванням пічних вагонеток для п'яти- (а) та шестистовпчикових (б) схем садки напівфабрикату марки КШУ-16

Аналіз одержаних результатів, а також практичний досвід діючої тунельної печі, показують, що сумарна потужність пічних вентиляторів, встановлених в її зоні охолодження, є достатньою під час підвищення її продуктивності до одинадцяти проштовхувань пічних вагонеток на

зміну, як для п'ятистовпчикової схеми садки вогнетривів марки КШУ-16, так і для їх шестистовпчикової схеми. Для збільшення кількості проштовхувань вагонеток у печі до дванадцяти та тринадцяти на зміну в зоні охолодження слід встановити потужніші пічні вентилятори.

Збільшення кількості прошовхувань пічних вагонеток протягом зміни на тунельній печі шамотного цеху ВАТ «Запоріжвогнетрив» у діапазоні їх змінювання (шість-одинадцять), що є практично реалізованим, спричинює необхідність регулювання витрати повітря, що надходить до печі на охолодження випалених вогнетривів. Для цього вказану зону печі слід обладнати системою автоматичного регулювання аеродинамічного режиму її роботи, до основи ал-

горитму якої має бути покладеним вирішення трансцендентного рівняння, що одержують на ПЕОМ.

Висновки. Запропоновано методи інженерного розрахунку коригування інтервалу часу між прошовхуванням пічних вагонеток каналом тунельної печі, а також коригування витрати повітря до зони охолодження печі для забезпечення стабільності якісних показників випалених вогнетривів.

Бібліографічний список

1. **Китаев, Б. И.** Теплообмен в шахтных печах [Текст] / Б. И. Китаев, Ю. Г. Ярошенко, В. В. Сучков. – М. : Металлургия, 1957. – 279 с.
2. **Іванов, В. І.** Метод інженерного розрахунку режимів випалення напівфабрикату вогнетривів у високотемпературних тунельних печах [Текст] / В. І. Іванов, Т. М. Нестренко, В. Ю. Зінченко, О. І. Чепрасов // *Металургія : збірник наукових праць Запорізької державної інженерної академії.* – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2017. – Вип. 1 (37). – С. 117-121.
3. **Харченко, И. Г.** Теплофизические свойства магнезиальных огнеупоров в процессе обжига [Текст] / И. Г. Харченко, В. И. Иванов, В. С. Баздырев, Г. М. Подоляко // *Металлургия и коксохимия : темат. научн.-техн. сборник* – Киев : Техника, 1982. – Вып. 84. – С. 6-10.
4. **Харченко, И. Г.** Исследование комплекса теплофизических характеристик муллитокорундовых огнеупоров в процессе обжига [Текст] / И. Г. Харченко, В. И. Иванов, В. А. Скачков, В. Т. Березовский // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1985. – № 4 (138). – С. 41-42.
5. **Миснар, А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей и газов и их композиций [Текст] / А. Миснар. – М. : Мир, 1968. – 463 с.
6. **Литовский, Е. Я.** Теплофизические свойства огнеупоров [Текст] / Е. Я. Литовский, Н. А. Пучкелевич ; справочник. – М. : Металлургия, 1982. – 150 с.
7. **Аверин, С. И.** Расчеты нагревательных печей [Текст] / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов и др.; учеб. пособие; под ред. Н. Ю. Тайца. – 2-е изд. испр. и доп. – Киев : Техника, 1969. – 540 с.
8. **Харченко, И. Г.** Метод расчета коррекции температурного режима туннельных печей [Текст] / И. Г. Харченко, В. И. Иванов, Г. А. Молотков и др. // *Огнеупоры.* – 1974. - № 7. – С. 14-18.
9. **Аббакумов, В. Г.** Конвективный теплообмен в туннельных печах [Текст] / В. Г. Аббакумов, Г. Ш. Ашкиндзе // *Огнеупоры.* – 1972. – № 3. – С. 20-27.
10. **Аббакумов, В. Г.** Теплопередача на продольных и торцевых поверхностях садки изделий [Текст] / В. Г. Аббакумов // *Огнеупоры.* – 1967. – № 1. – С. 21-28.

ІВАНОВ Віктор Ільич, старший. научный сотрудник кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: vitas.1947@mail.ru

НЕСТЕРЕНКО Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: tan-nesterenko@ukr.net

ЗИНЧЕНКО Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: elelna.zinchenko@mail.ru

ЧЕПРАСОВ Александр Иванович, кандидат технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: alex.i.-chepraov@gmail.com

МЕТОД ІНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ОБЖИГА И ОХЛАЖДЕНИЯ ОГНЕУПОРОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

На основе решения дифференциального балансового уравнения теплообмена пластины в противотоке разработаны методы инженерного расчета для корректировки интервала времени между проталкиванием печных вагонеток с салками полуфабриката огнеупоров по каналу туннельной печи, а также корректировки расхода воздуха для охлаждения обожженных огнеупоров. Детально изложена методика вычисления коэффициентов теплоотдачи в зоне охлаждения печи. Использование изложенных методик позволит повысить качественные показатели готовой продукции.

Ключевые слова: высокотемпературная туннельная печь, огнеупоры, уравнение теплообмена пластины в противотоке, интервал между проталкиванием печных вагонеток, расход воздуха на охлаждение, корректировка

IVANOV Victor, Senior Staff Scientist of Metallurgy Department, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: vitas.1947@mail.ru

NESTERENKO Tatiana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metallurgy Department, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: tan-nesterenko@ukr.net

ZINCHENKO Vladimir, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Automation of Flow Processes, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: elelna.zinchenko@mail.ru

CHEPRASOV Olexander, Candidate of Technical Sciences, professor of Department of Heat Power Engineering and Hydroenergetics, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: alex.i.chepraov@gmail.com

METHOD OF ENGINEERING CALCULATION OF TEMPERATURE MODES FOR BURNING AND COOLING OF REFRACTORIES IN HIGH TUNNEL FURNACES

On the basis of differential equation decision for heat exchange of plate in backward flow the methods of engineering calculation are worked out for correction of interval between pokes of trams by the channel of a tunnel furnace, and also expense of air for cooling of the burnt refractories. The methods of heat emission coefficients calculation in the cooling zone of furnace in detail are stated. The use of the state methods will allow to raise the high-quality factors of the finished products.

Keywords: a high temperature tunnel furnace, refractories, equation of heat exchange of plate in backward flow, interval between pokes of trams, expense of air on cooling, correction

Стаття надійшла до редакції 06.08.2017 р.
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>